УДК 620.174.2: 539. 434, 539.42

ЗАКОНОМЕРНОСТИ МАЛОЦИКЛОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ, РАЗРУШЕНИЯ И ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ШТАМПОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Пряхин В.В.

НОУ ВПО «Камский институт гуманитарных и инженерных технологий», Ижевск, e-mail: vasily.pryahin@mail.ru

Проведены: а) исследование закономерностей малоциклового деформирования и разрушения сталей 5ХНМ, 5ХНМФС, 4Х5НМФС при эксплуатационных температурах (20 °С, 450 °С). Выявлено, что сопротивление деформированию исследуемых материалов снижается с ростом числа циклов нагружения и температуры испытаний. Полученные кривые малоцикловой усталости позволили установить, что стали 4Х5МФС и 5ХНМФ обладают более высоким сопротивлением малоцикловому деформированию и разрушению, чем сталь 5ХНМ; б) исследование закономерностей малоциклового деформирования и накопления повреждений сталей 5ХНМ и 5ХНМФС при малоцикловом нестационарном термомеханическом нагружении. Температура ступеней составляла 20, 200 и 450 °С. Амплитуды деформаций на ступенях изменялись в диапазоне 1,16 … 0,30 % и соответствовали долговечности 5×10^2 … 2×10^4 циклов до образования трещины или разрушения. Экспериментально обоснована приемлемость линейной гипотезы накопления повреждений в случае нестационарных силовых и температурных воздействий при деформационной трактовку процессов малоциклового разрушения.

Ключевые слова: усталостная трещина, малоцикловая усталость, диаграммы деформирования, накопленные повреждения

LAWS MALOTCIKLOVOJ DEFORMATION, FRACTURE AND THE IMPACT ON DAMAGE NONSTATIONARY NAERUZHENIYA DIE MATERIALS UNDER OPERATING TEMPERATURES

Priakhin V.V.

Kamsky Institute of Humanities and engineering technologies, Izhevsk, e-mail: vasily.pryahin@mail.ru

A study of low-cyclic deformation and failure regularities of 5ХНМ, 5ХНМФС, 4Х5МФС steels under working temperatures (20°C, 450°C) was conducted. It was obtained that resistanse to deformation of tested materials is reduced with the growth of loading cycle number and test temperature. Obtained curves of low-cyclic fatigue make it possible to find out that such steel as 4Х5МФС and 5ХНМФ have higher resistanse to low-cyclic deformation and failure that 5ХНМ steel has. A study of low-cyclic deformation and damage accumulation regularities of 5ХНМ and 5ХНМФС steel under low-cyclic nonstationary thermomechanical loading was conducted. Temperature of steps was 20, 200 and 450 C. Deformation amplitudes on the steps changed in the range from 1,16 to 0,30 % and corresponded to a lifetime from 5×10^2 to 2×10^4 cycles till crack or failure formation. It was obtained that generalized deformation diagrams on a stabilization state nearly coincide under stationary and program thermomechanical loading.

Keywords: fatigue crack, low cycle fatigue, deformation diagram of accumulated damage

Одной из основных причин выхода из строя кузнечных штампов объемного деформирования с глубокими гравюрами, при производстве поковок типа катков с широким венцом, является образование и развитие магистральных трещин, образующихся при малом числе циклов нагружения (10^2–10^5), в угловых переходах от боковой поверхности к днищу, у основания бобышек и в галтелях хвостовика. В других случаях причиной выхода из строя штампов может быть истирание, смятие, разгар, в результате теплового удара (облойные мостики, бобышки, выступающие углы). В зависимости от формы поковки каждый из указанных факторов может быть преобладающим и определять стойкость штампа. Причиной возникновения трещин малоцикловой усталости является концентрация напряжений и деформаций в указанных участках штампа. При этом штамп в целом деформируется упруго, а зоны концентрации испытывают циклические упругопластические деформации, достигающие 1–2 % [1].

В температурном режиме работы штампов горячего объемного деформирования металлов различают четыре стадии: предварительный подогрев, нестабильный температурно-силовой режим начала работы, наиболее продолжительный квазистационарный период при установившемся режиме рабочего: процесса и период естественного охлаждения по окончании процесса штамповки. Температура участков гравюры (облойные мостики, бобышки и т.п.), которые в первую очередь соприкасаются с разогретой заготовкой, повышается с 300 до 550–650 °С, а ее градиент достигает максимального значения. При соприкосновении металла заготовки с дном глубокой полости значительная часть тепла уже отдана, поэтому температура угловых

переходов гравюры колеблется в диапазоне 200–450 °С, а градиент температуры снижается в 2–3 раза.

Нестационарность силового нагружения штампа вызывается изменением сопротивления пластическому деформированию материала за счет рассеяния температуры заготовки, состоянием облойного мостика, отклонениями фактического объема заготовки от оптимального значения и другими причинами, что в ряде случаев приводит к преждевременному выходу из строя штампов [1].

Проблема повышения стойкости штампов приобретает особую остроту в связи с автоматизацией процесса штамповки и созданием роботизированных кузнечно-прессовых комплексов.

На первом этапе ставилась цель – исследовать сопротивление малоцикловому деформированию и разрушению перспективных штамповых сталей 4Х5МФС, 5ХНМФС и широко распространенной стали 5ХНМ в процессе малоциклового нагружения при нормальной и повышенной (450 °С) температурах. Режимы термической обработки и механические характеристики исследуемых материалов указаны в табл. 1. Твердость сталей после отпуска составляла HRC = 40–42, что примерно соответствует твердости гравюры крупных штампов объемного деформирования.

Таблица 1

Марка стали	Режим термообработки	T, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %
4Х5МФС	Закалка (воздух, 1040 °С, 10 мин.);	20	1150,0	1400,0	13,7	39,5
	отпуск (630 °С, 4 час)	450	865,0	1126,0	11,2	44,6
5ХНМФС	Закалка (масло, 960 °С, 10 мин.);	20	1240,0	1340,0	13,5	38,6
	отпуск (625 °С, 6 час)	450	840,0	1011,0	10,1	42,6
5ХНМ	Закалка (масло, 850 °С, 10 мин.);	20	1240,0	1380,0	13,0	38,5
	отпуск (490 °С, 4 час)	450	790,0	952,0	12,0	58,0

Испытания на малоцикловую усталость проводили на специально разработанной установке [7, 8, 20] при чистом плоском изгибе образцов, длина, ширина и высота рабочей части которых равнялась соответственно 30, 10 и 5 мм. Прогиб образца при испытаниях изменялся по симметричному циклу, поскольку в этом случае ограниченные пределы выносливости имеют минимальные значения. Частота нагружения составляла 25 цикл/мин. Образцы нагревали пропусканием электрического тока. Измерение и поддержание заданной температуры обеспечивалось потенциометром ПСР1-03.

В процессе испытаний выборочно по числу полуциклов нагружения k записывали диаграммы чистого упругопластического изгиба в координатах «изгибающий момент M – прогиб f расчетной части образца». По диаграммам изгиба в соответствии с работами [2. 3, 4, 8] определяли, для наиболее удаленного слоя образца, деформацию ε, номинальное напряжение $S_н$ и действительное напряжение S с учетом пластической деформации. Полученные данные использовали для построения обобщенных диаграмм упругопластического деформирования [3, 5]. На рис. 1 приведены такие диаграммы для стали 4Х5МФС. Аналогичные диаграммы были построены для сталей 5ХНМФС и 5ХНМ.

Выявлено, что у всех исследуемых материалов сопротивление деформированию снижается по мере роста числа циклов нагружений. При 450 °С сопротивление деформированию ниже, чем при нормальной температуре, а процесс разупрочнения протекает интенсивнее. При обеих температурах сопротивление деформированию сталей 4Х5МФС и 5ХНМФС выше, чем у стали 5ХНМ.

Следует иметь в виду, что формоизменение гравюры штампа, накопление повреждений от истирания и смятия определяются, главным образом, величиной действующих напряжений, а усталостное разрушение штампов обусловлено повторными упругопластическими деформациями в зонах концентрации напряжений. В соответствии с этим исследовали сопротивление усталостному разрушению штамповых сталей при силовой и деформационной трактовках процесса разрушения. Поскольку размеры образцов существенно отличались от размеров штампов, то усталостным разрушением считали не окончательное разделение, а появление в образце трещины длиной 0,8–1 мм. При деформационной трактовке кривые малоцикловой усталости получали в координатах «размах упругопластической деформации Δε – число циклов N_T до появления трещины». При силовой трактовке кривые малоцикловой усталости строили в осях «размах напряжения Δσ – число циклов N_T». Уровни Δε, Δσ выбирали при числе циклов, равном половине долговечности образца. Для построения кривых малоци-

кловой усталости использовали результаты испытаний не менее 15 образцов каждого материала.

Данные усталостных испытаний (рис. 2) подвергали статистической обработке по известной [9, 14] методике. При этом, зависимости между размахами деформаций, напряжений и числом циклов были приняты в виде степенных функций $\Delta\varepsilon \times N_T{}^m = A$, $\Delta\sigma \times N_T{}^n = B$, где m, A, и n, B – параметры кривых малоцикловой усталости при деформационной и силовой трактовках процесса разрушения. В результате статистической обработки определены параметры кривых малоцикловой усталости (табл. 2).

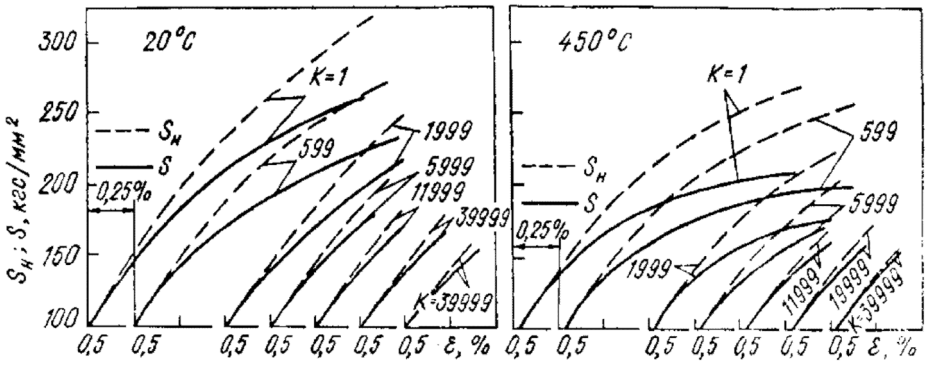


Рис. 1. Обобщенные диаграммы деформирования стали 4Х5МФС, при нормальной и повышенной температурах

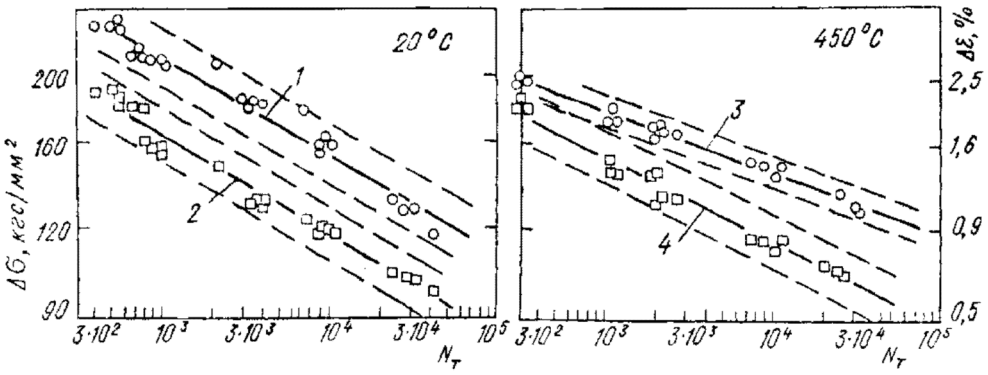


Рис. 2. Зависимость малоцикловой усталости стали 4Х5МФС от размаха напряжений (1, 3) и упругопластических деформаций (2, 4), при нормальной и повышенной температурах (пунктиром отмечены области рассеивания данных эксперимента с вероятностью 99,73 %)

Для сопоставления долговечности штамповых сталей, при деформационной трактовке процесса разрушения, выбраны три уровня амплитуды деформации, равные 0,8; 0,4 и 0,3 %. Соответствующие значения долговечностей, при нормальной и повышенной температурах, приведены в табл. 3. Из полученных данных видно, что при нормальной температуре все испытанные стали имеют примерно одинаковое сопротивление разрушению, тогда как при 450 °С долговечности этих сталей существенно разные. При низком уровне задаваемой деформации (0,3 %) несколько большую долговечность имела сталь марки 5ХНМФС, тогда как при амплитуде деформаций 0,8 % долговечность исследуемых материалов примерно одинакова.

В табл. 3 приведены данные о долговечности исследуемых материалов при силовой трактовке процесса разрушения: сопоставлены результаты, полученные при трех амплитудах напряжений, равных 1000, 800 и 600 МПа. Видно, что более высокую долговечность имеют стали 4Х5МФС и 5ХНМФС. С повышением температуры испытаний до 450 °С долговечность стали 5ХНМ существенно снижается.

Таблица 2

Марка стали	*T*, °C	*m*	*A, %*	*n*	*B, МПа*
4Х5МФС	20	0,299903	13,409	0,142159	5723,0
	450	0,236984	7,490	0,087713	3274,1
5ХНМФС	20	0,328462	16,065	0,155508	6007,0
	450	0,197608	5,641	0,078241	3051,1
5ХНМ	20	0,330246	16,497	0,125255	4669,1
	450	0,293979	12,422	0,079341	2401,3

Таблица 3

Марка стали	*T*,° C	Δε, %			Δσ, МПа		
		0,8	0,4	0,3	1000	800	600
		Долговечность (в циклах)					
4Х5МФС	20 450	1400 681	10700 11260	31547 42704	1653 276	7825 3511	59200 93280
5ХНМФС	20 450	1040 588	9300 19620	22220 84120	1179 221	4955 3829	31480 131600
5ХНМ	20 450	1090 1066	12600 12680	22807 29967	870 10	5170 167	51400 6269

Таким образом, проведенное исследование позволило установить, что стали 4Х5МФС и 5ХНМФС в сравнении со сталью 5ХНМ обладают более высоким сопротивлением малоцикловому деформированию и разрушению.

На втором этапе, в продолжение работ [2–11], изучали закономерности малоциклового деформирования и накопления повреждений сталей 5ХНМ и 5ХНМФС при нестационарном силовом и температурном нагружениях. Твердость материалов, также, составляла 40–42 HRC. Как показал проведенный анализ [1], материал в зонах концентрации, при близком к отнулевому циклу нагружения штампа, испытывает примерно симметричный цикл изменения местных напряжений и упругопластических деформаций. При этом напряжения в зонах концентрации существенно больше удельной деформирующей силы на зеркало гравюры. Испытания на малоцикловую усталость осуществлялись в условиях чистого изгиба, при симметричном цикле, на установке [7, 8, 20].

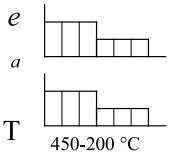
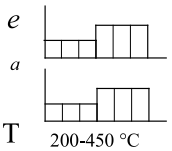
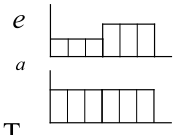
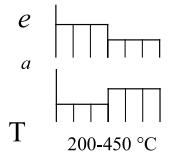
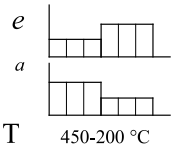
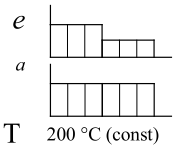
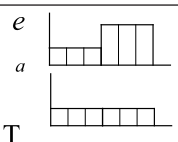
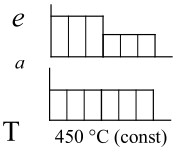
Программа испытаний включала двухступенчатое одно- и многоблочное синхронное изменение уровня температуры и амплитуды деформации. Температура ступеней составляет 20, 200 и 450 °C; амплитуды упругопластических деформаций e_a на ступенях варьировались в диапазоне 1,16–0,30 %, что соответствует долговечности 5×10^2–2×10^4 циклов до образования трещины N_T длиной 0,5–0,8 мм или до разрушения *N* (Табл. 4). Такие режимы нагружения и нагрева близки к условиям работы материала угловых участков гравюры штампа.

Испытания проведены по одиннадцати программам при различных сочетаниях амплитуд деформаций и уровней температуры. При этом предварительно получены обобщенные диаграммы деформирования $S^{(к)}$–$\varepsilon^{(к)}$ исследуемых материалов в условиях жесткого стационарного нагружения при температурах 20, 200 и 450 °C, а затем изучено влияние нестационарного термомеханического нагружения на закономерности малоциклового деформирования и накопления повреждений. Программные испытания проводили при различных сочетаниях амплитуд деформаций и уровней температуры. Данные результатов испытаний стали 5ХНМФС приведены в табл. 4.

В ходе испытаний, по методике [2, 3, 4, 8], на каждой из ступеней термомеханического нагружения, зафиксированы деформации $\varepsilon^{(к)}$ и действительные напряжения $S^{(к)}$ при постоянном числе полуциклов *K,* и по ним построены обобщенные диаграммы стационарного деформирования сталей 5ХНМ и 5ХНМФС, при соответствующих температурах.

Установлено, что обобщенные диаграммы деформирования $S^{(к)}$–$\varepsilon^{(к)}$, на стадии стабилизации, в характерном для штампов диапазоне долговечностей (5×10^2–2×10^4 циклов) при стационарном и программном термомеханическом нагружениях, практически совпадают (рис. 3). Этот вывод согласуется с результатами ряда работ для других материалов, и подтверждает существование термомеханической поверхности деформирования- $S^{(к)}$–$\varepsilon^{(к)}$–T, и ее инвариантность от предыстории программного термомеханического нагружения. Таким образом, обобщенные диаграммы деформирования $S^{(к)}$–$\varepsilon^{(к)}$, полученные при стационарном изотермическом нагружении [2, 3, 4, 7–11], можно использовать при анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов штампов в эксплуатации.

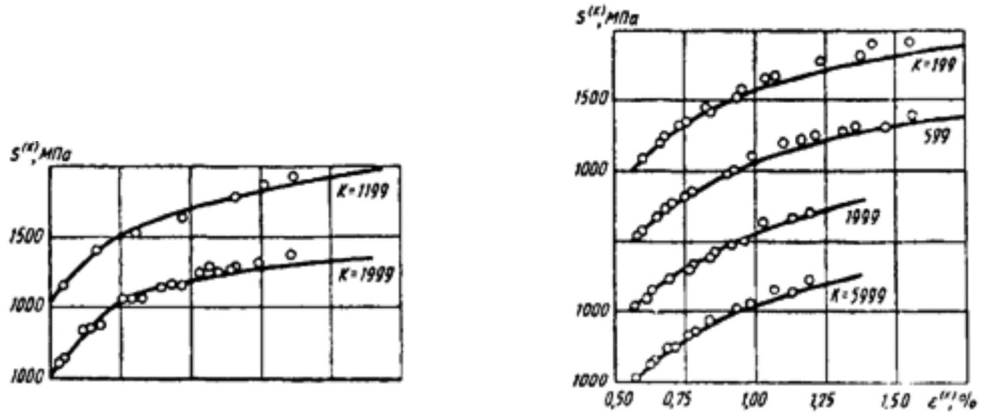
Таблица 4

№ программы	Режим	№ образца	e_{a_1}, %	n_1, циклы	$\frac{a_{1T}}{a_1}$	e_{a2}, %	$\frac{n_{2T}}{n_2}$, цикл	$\frac{a_{2T}}{a_2}$	$\frac{a_T}{a}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I		1	0,797	300	$\frac{0,498}{0,272}$	0,640	$\frac{600}{1606}$	$\frac{0,322}{0,618}$	$\frac{0,820}{0,889}$
		2	0,781	300	$\frac{0,468}{0,267}$	0,642	$\frac{660}{1445}$	$\frac{0,357}{0,558}$	$\frac{0,825}{0,825}$
II		3	0,575	1000	$\frac{0,386}{0,271}$	0,733	$\frac{450}{956}$	$\frac{0,529}{0,688}$	$\frac{0,914}{0,959}$
		4	0,568	1000	$\frac{0,370}{0,260}$	0,787	$\frac{400}{885}$	$\frac{0,641}{0,789}$	$\frac{1,011}{1,049}$
III		5	0,869	300	$\frac{0,407}{0,283}$	0,560	$\frac{820}{2072}$	$\frac{0,294}{0,571}$	$\frac{0,701}{0,854}$
		6	0,849	300	$\frac{0,378}{0,266}$	0,556	$\frac{950}{2481}$	$\frac{0,332}{0,662}$	$\frac{0,710}{0,927}$
IV		7	0,598	1000	$\frac{0,484}{0,357}$	0,923	$\frac{150}{394}$	$\frac{0,242}{0,436}$	$\frac{0,727}{0,792}$
		8	0,583	1000	$\frac{0,424}{0,321}$	0,863	$\frac{220}{461}$	$\frac{0,290}{0,430}$	$\frac{0,714}{0,751}$
V		9	0,924	300	$\frac{0,487}{0,334}$	0,557	$\frac{1450}{3535}$	$\frac{0,503}{0,858}$	$\frac{0,990}{1,192}$
		10	0,932	300	$\frac{0,498}{0,341}$	0,571	$\frac{1020}{2974}$	$\frac{0,388}{0,791}$	$\frac{0,885}{1,133}$
VI		11	0,579	1000	$\frac{0,394}{0,279}$	0,943	$\frac{285}{618}$	$\frac{0,486}{0,723}$	$\frac{0,880}{1,002}$
		12	0,568	1000	$\frac{0,368}{0,260}$	0,940	$\frac{310}{610}$	$\frac{0,525}{0,709}$	$\frac{0,894}{0,969}$
VII		13	0,865	300	$\frac{0,734}{0,353}$	0,666	$\frac{440}{1067}$	$\frac{0,330}{0,540}$	$\frac{1,063}{0,892}$
		14	0,772	300	$\frac{0,444}{0,252}$	0,605	$\frac{560}{1023}$	$\frac{0,284}{0,380}$	$\frac{0,728}{0,632}$
		15	0,755	300	$\frac{0,407}{0,238}$	0,458	$\frac{1670}{3237}$	$\frac{0,236}{0,355}$	$\frac{0,642}{0,593}$
VIII		16	0,598	1000	$\frac{0,483}{0,357}$	0,799	$\frac{380}{674}$	$\frac{0,645}{0,625}$	$\frac{1,128}{0,981}$
		17	0,578	1000	$\frac{0,412}{0,309}$	0,801	$\frac{390}{582}$	$\frac{0,671}{0,543}$	$\frac{1,083}{0,852}$

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IX	*e* *a* T 200-450 °C	18	0,587	1000	0,412 / 0,292	0,596	1260 / 2094	0,594 / 0,583	1,006 / 0,875
		19	0,579	1000	0,389 / 0,275	0,610	1090 / 1882	0,368 / 0,756	0,957 / 0,991
		20	0,649	300	0,169 / 0,120	0,690	950 / 1430	0,854 / 0,846	1,023 / 0,966
X	*e* *a* T 450-200 °C	21	0,575	1000	0,405 / 0,306	0,574	1500 / 2060	0,577 / 0,555	0,982 / 0,860
		22	0,563	1000	0,424 / 0,316	0,557	2090 / 2657	0,721 / 0,642	1,145 / 0,958
		23	0,715	300	0,317 / 0,197	0,671	690 / 1330	0,430 / 0,594	0,747 / 0,791
XI	*e* *a* T 20 °C (const)	24	1,122	125	0,253 / 0,167	0,687	1205 / 1533	0,843 / 0,630	1,096 / 0,797
		25	1,122	100	0,202 / 0,133	0,297	19155 / 22800	0,584 / 0,420	0,786 / 0,553
		26	1,122	100	0,202 / 0,133	0,297	20715 / 24690	0,631 / 0,454	0,833 / 0,587
		27	1,162	100	0,220 / 0,145	0,297	21390 / 29752	0,652 / 0,548	0,872 / 0,693

Примечание: В числителе указаны результаты испытаний на трещинообразование, в знаменателе – на разрушение.



а) *б)*

Рис. 3. Обобщенные диаграммы деформирования стали 5ХНМФС при температуре T = 200 (а) и T = 450 °C (б), в условиях стационарного (линии) и программного (точки) малоциклового термомеханического нагружения

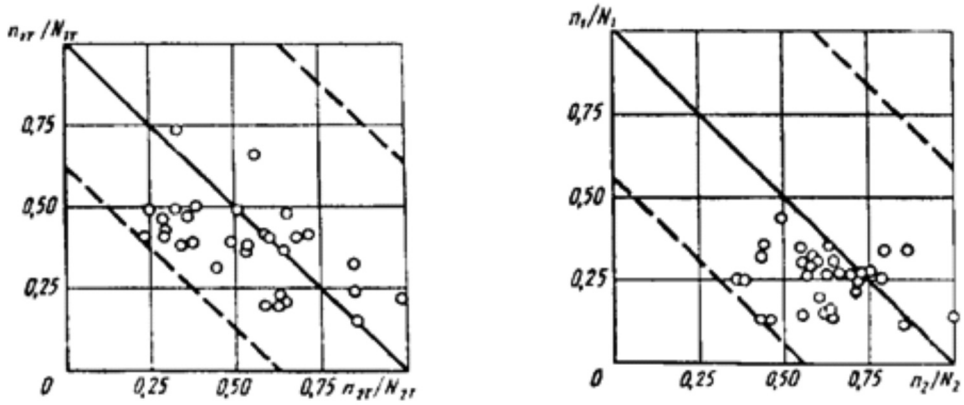
Исследование малоцикловой усталости, при нестационарном термомеханическом нагружении, проведено, также по режимам, указанным в табл. 4. При этом, предварительно были получены и статистически обработаны кривые малоцикловой устало-

сти e_a–N_T и e_a–N сталей 5ХНМ и 5ХНМФС в условиях жесткого стационарного нагружения, при температурах 20, 200 и 450 °С. Накопление усталостных повреждений, на первой a_1 и второй a_2 ступенях, определено по зависимости

$$a = \sum_{i=1}^{j} (e_{ai} / C_e)^{1/m_e} n_i ,$$

где e_{ai}, n_i – амплитуда деформации и накопленное число циклов на i-й ступени; j – число ступеней; m_e, C_e – параметры кривых малоцикловой усталости при жестком стационарно в образце трещин длиной 0,5–0,8 мм и по разрушению (рис. 4).

Выявлено, что режимы деформирования сравнительно слабо влияют на величину предельного повреждения сталей 5ХНМ и 5ХНМФС, в диапазоне температур 20–450 °С. Вместе с тем, можно отметить, что несколько более повреждающими режимами являются те, которые начинаются с больших амплитуд деформаций и уровней температур. При многоблочном термомеханическом нагружении, когда проявляется эффект «перемешивания» ступеней, наблюдается существенно меньший разброс предельных накопленных повреждений. Для стали 5ХНМ, например, предельные накопленные повреждения находятся в диапазонах: по образованию трещины: a_T = 0,57–1,14; по разрушению a = 0,55–1,16; для стали 5ХНМФС соответственно a_T = 0,64–1,21; a = 0,55–1,19. Указанные значения накопленных повреждений укладываются в поле рассеяния результатов малоцикловых испытаний исследуемых материалов при стационарном жестком нагружении. Это подтверждает приемлемость линейной гипотезы накопления повреждений в случае нестационарных силовых и температурных воздействий при деформационной трактовке процессов малоциклового разрушения.



а) *б)*

Рис. 4. Результаты оценки повреждаемости стали 5ХНМФС по экспериментальным кривым усталости при малоцикловом программном термомеханическом нагружении, по трещинообразованию (а), и разрушению (б): точки – эксперимент; сплошная линия – линейная гипотеза; штриховая линия – поле рассеяния результатов эксперимента с вероятностью 99,7% при стационарном нагружении

Полученные результаты позволяют использовать, разработанный ранее, РТМЗ-1637–84 [6, 14, 19, 21] для оценки кинетики НДС и прочности элементов штампов в условиях малоциклового нестационарного термомеханического нагружения, при разработке и создании перспективных материалов.

Список литературы

1. Тылкин М.А., Васильев Д.И., Рогалев А.М., Шкатов А.П., Бельский Е.И. Штампы для горячего деформирования металлов. – М.: Высшая школа, 1977. – 472 с.

2. Добровольский В.И., Пряхин. В.В. Исследование упругопластического изгиба балок различных сечений // Пробл. прочности. – 1976. – № 12. – С. 60–62.

3. Добровольский В.И., Пряхин В.В. Методика исследования диаграмм деформирования и долговечности при циклическом упругопластическом изгибе // Заводск. лаборатория. – 1977. – № 12. – С. 1503–1504.

4. Добровольский В.И., Кучерявый Б.П., Пряхин В.В. О сопротивлении штамповых сталей деформированию и разрушению в процессе эксплуатации // Физ.-хим. механика материалов. – 1979. – № 5. – С. 106–108.

5. Добровольский В.И., Кучерявый Б.П., Пряхин В.В. Исследование конструктивной прочности штамповых сталей при малоцикловой усталости // Вестник машиностроения. – 1984. – № 9. – С. 58–60.

6. Пряхин В.В., Добровольский В.И., Кучерявый Б.П. Руководящий технический материал. Материалы для штампов. Методы определения прочности при малоцикловой механической усталости. РТМ З-1637–84. Издание официальное. – М.: Изд-во стандартов. – 1984. – 75 с.

7. Добровольский В.И., Пряхин В.В. Патент на изобретение RUS 800811. Установка для испытания материалов на малоцикловую усталость при чистом изгибе: МКИЗ G 01 N 3/34. 03.04.1979.

8. Добровольский В.И., Пряхин В.В. Патент на изобретение RUS 911129/ Способ измерения деформации при изгибе: МКИЗ G 01 B 5/30. 01.08.1980.

9. Добровольский В.И., Пряхин В.В. Факторный анализ малоцикловой долговечности элементов конструкций по трещинообразованию и разрушению // Физ.-хим. механика материалов. – 1998. – № 6. – С. 121–123.

10. Пряхин В.В., Кулагин А.В., Бузилов С.В. Влияние физико-механических характеристик специальных материалов на прочность // Сборник научных трудов Sworld. – 2010. – Т. 4., № 1. – С. 7–8.

11. Пряхин В.В., Кулагин А.В. Малоцикловая усталость специальной стали в условиях повышенных температур // Сборник научных трудов Sworld. – 2009. – Т. 2, № 3. – С. 16–18.

12. Пряхин В.В., Добровольский В.И. Влияние малоциклового нестационарного нагружения на повреждаемость штамповых материалов // Вестник КИГИТ. – 2009. – № 2. – С. 36–43.

13. Добровольский В.И., Пряхин В.В. Закономерности малоциклового деформирования и разрушения штамповых сталей при эксплуатационных температурах // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2006. – № 1. – С. 43–45.

14. Пряхин В.В. Сопротивление деформированию и разрушению материалов и элементов штампов при малоцикловом нестационарном термомеханическом нагружении: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Пермь. – 1989. – 19 с.

15. Пряхин В.В. Оценка малоцикловой конструктивной прочности штамповых материалов в условиях эксплуатационных температур // В сборнике научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в образовании и науке» (31 октября 2013) в 26 частях. Часть 16; М-во обр. и науки РФ. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество». – 2013. – С. 111–112.

16. Шульга Б.Н., Пряхин В.В. Растяжение (сжатие) и кручение. Расчеты бруса на прочность и жесткость при растяжении (сжатии) и кручении // Ижевск: Изд-во УдГУ. 2002.

17. Добровольский В.И., Демидов Л.Д., Пряхин В.В. О связи твердости штамповой стали с прочностью и долговечностью при малоцикловом нагружении // Физико-химическая механика материалов. – 1983. – Т. 19, № 2. – С. 86–88.

18. Добровольский В.И., Кучерявый Б.П., Пряхин В.В. Влияние шероховатости поверхности на долговечность штамповой стали при малоцикловой усталости // Проблемы прочности. – 1983. – № 9. – С. 113–115.

19. Пряхин В.В., Добровольский В.И. Методы и средства для исследования сопротивления малоцикловому деформированию и разрушению // В сборнике: Расчет и управление надежностью больших систем. Информационные материалы. Научный редактор Тимашев С.А. Свердловск. – 1988. – С. 188–189.

19. Добровольский В.И., Пряхин В.В. Установка для программных испытаний материалов на малоцикловую усталость при чистом изгибе // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1982. – Т. 48, № 4. – С. 77–79.

20. Добровольский В.И., Пряхин В.В. Методы испытаний и расчетов на малоцикловую прочность материалов и элементов кузнечных штампов // Руководящий технический материал. Ижевск: Удмуртский ЦНТИ. – 1992.